

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA, POROSIMÉTRICA Y ESTRUCTURAL DE  
AGREGADOS PÉTREOS EN CANTERAS DEL RÍO GUATIQUE, MARGEN IZQUIERDA  
DE LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO

MARÍA CAMILA LOZANO CHINGATE  
CARLOS ANDRÉS GONZÁLEZ PEÑA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS  
BOGOTÁ D.C – 2017

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA, POROSIMÉTRICA Y ESTRUCTURAL DE  
AGREGADOS PÉTREOS EN CANTERAS DEL RÍO GUATIQUE, MARGEN IZQUIERDA  
DE LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO

MARÍA CAMILA LOZANO CHINGATE  
CARLOS ANDRÉS GONZÁLEZ PEÑA

Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Ingeniería de Pavimentos

ASESOR

Juan Carlos Ruge Cárdenas, PhD.

Ingeniero Civil, Magíster en Geotecnia, Doctor en Geotecnia

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS  
BOGOTÁ D.C – 2017



La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

**Usted es libre de:**



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

**Bajo las condiciones siguientes:**



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	11
1. GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO .....	12
1.1. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN Y EJE TEMÁTICO .....	12
1.1.1. Línea de investigación.....	12
1.1.2. Eje temático .....	12
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	12
1.2.1. Problema a resolver .....	12
1.2.2. Antecedentes .....	12
1.2.3. Pregunta de investigación .....	13
1.2.4. Variables del problema .....	13
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	13
1.4. OBJETIVOS .....	14
1.4.1. General.....	14
1.4.2. Específicos .....	14
1.5 CROGRAMA .....	15
1.6 Presupuesto .....	16
2. MARCOS DE REFERENCIA.....	17
2.1. MARCO TEÓRICO .....	17
2.1.1 Caracterización mineralógica.....	17
2.1.2 Análisis petrográficos .....	18
2.1.3 Porosimetría .....	19
2.2 MARCO TECNOLÓGICO .....	19
2.2.1 Fluorescencia de rayos X.....	19
2.2.2 Difracción de rayos X.....	20
2.2.3 Microscopia.....	20
2.3 MARCO JURÍDICO .....	20
2.4 MARCO GEOGRÁFICO .....	22
3. METODOLOGÍA .....	25
3.1 FASE PRELIMINAR.....	25

3.2 FASES DE CAMPO E IDENTIFICACIÓN .....	25
3.3 FASE DE ENSAYOS APLICADOS A LA MUESTRA.....	25
3.3.1 Fluorescencia de rayos X (FRX).....	25
3.3.1.1 Instrumentación y parámetros. ....	25
3.3.2 Difracción de rayos X (DRX).....	26
3.3.2.1 Procedimiento de preparación.....	26
3.3.2.2 Instrumentación y parámetros. ....	26
3.3.3 Microscopia de barrido (SEM) .....	26
3.3.3.1 Procedimiento .....	26
3.3.3.2 Instrumentación y parámetros .....	27
3.4 FASES DE CARACTERIZACIÓN.....	27
3.5 FASE DE ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO FINAL .....	27
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	28
4.1 FLUORESCENCIA POR RAYOS X (FRX) .....	28
4.2 DIFRACCIÓN POR RAYOS X (DRX) .....	29
4.2.1 Montaje en polvo.....	29
4.3 MICROSCOPIA DE BARRIDO (SEM).....	30
4.3.1 Resultados porosimetría .....	31
4.3.1.1 Grano Tipo 1 .....	31
4.3.1.2 Grano Tipo 2.....	32
4.3.1.3 Grano Tipo 3.....	33
4.3.1.4 Grano Tipo 4.....	34
4.4 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	35
4.4.1 Grano Tipo 1. ....	35
4.4.2 Grano tipo 2. ....	37
4.4.3 Grano tipo 3. ....	39
4.4.4 Grano tipo 4. ....	41
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	44
BIBLIOGRAFÍA .....	45

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Presupuesto global de la propuesta por fuentes de financiación (en miles de \$).....	15
Tabla 2. Descripción y cuantificación de los equipos de uso propio (en miles de \$) .....	16
Tabla 3. Descripción y justificación de los viajes (en miles de \$).....	16
Tabla 4. Materiales y suministros (en miles de \$) .....	16
Tabla 5. Porcentaje en peso (% peso) de cada fase mineral identificada en la muestra. ....	29
Tabla 6. % Área porosa Grano Tipo 1. ....	32
Tabla 7. % Área porosa Grano Tipo 2. ....	33
Tabla 8. % Área porosa Grano Tipo 3. ....	34
Tabla 9 % Área porosa Grano Tipo 4. ....	34
Tabla 10. Grano tipo 1: Minerales detectados. ....	35
Tabla 11. Grano tipo 2: Minerales detectados. ....	37
Tabla 12. Grano tipo 3: Minerales detectados. ....	39
Tabla 13. Grano tipo 4: Minerales detectados. ....	41

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación geográfica del departamento del Meta.....	23
Ilustración 2 Municipio de Villavicencio .....	24
Ilustración 3. Montajes con granos después del metalizado con grafito.....	27
Ilustración 4. Resultados de FRX para la muestra "M-1". Fuente: los autores.....	28
Ilustración 5. Proporción mineralógica de las muestras .....	30
Ilustración 6. Difractograma 1. Muestra 1 en polvo.....	30
Ilustración 7. Micrografía grano tipo 1. Cálculo de área porosa .....	31
Ilustración 8. Micrografía grano tipo 2. Ejemplo cálculo de área porosa. ....	32
Ilustración 9. Micrografía grano tipo 3. Ejemplo cálculo de área porosa. ....	33
Ilustración 10. Micrografía grano tipo 4. Ejemplo cálculo de área porosa para muestra.....	34
Ilustración 11. Micrografía 5. Imagen generalizada de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados. ....	35
Ilustración 12. Espectro 1. De izquierda a derecha espectros de A) Cuarzo y B) Óxido de hierro.....	36
Ilustración 13. Micrografía 6. Imagen generalizada de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados. ....	36
Ilustración 14. Espectro 2. De izquierda a derecha espectros de a) Cuarzo y B) Óxido de hierro.....	37
Ilustración 15. Micrografía 7. Imagen generalizada de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados. ....	38
Ilustración 16. Espectros 3. Espectro de A y B) Caolinita.....	38
Ilustración 17. Micrografía 9. Imagen general de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados. ....	39
Ilustración 18. Espectros 4. De izquierda a derecha espectros de a) Cuarzo y B) Caolinita.....	40
Ilustración 19. Micrografía 10. Imagen detallada de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados. ....	40
Ilustración 20. Espectros 5. De izquierda a derecha espectros de a) Rutilo y B) Cuarzo. ....	41
Ilustración 21. Micrografía 11. Imagen general de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados. ....	42
Ilustración 22. Espectros 6. De izquierda a derecha espectros de a) Cuarzo y B) Caolinita.....	42
Ilustración 23. Micrografía 11. Imagen detallada de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados. Rt*: El mineral no fue confirmado por EDS pero por las propiedades que presenta es posible que se trate de rutilo. ....	43

## RESUMEN

El material pétreo es de vital importancia para cualquier tipo de construcción, por ello se hace necesario tener una completa caracterización del material que se puede encontrarse en las actuales zonas concesionadas del río Guatiquía; para así poder determinar la idoneidad de la utilización de estos materiales ya que las canteras de este afluente son de las más utilizadas en el municipio de Villavicencio-Meta.

El presente documento expone de manera lógica y racional los ensayos que se realizarán a las muestras obtenidas en ciertos lugares concesionados del afluente, ensayos como la porosimetría por intrusión de mercurio, Difractometría de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FRX) y demás necesarios para una correcta caracterización de los materiales.

**Palabras clave:** materiales de construcción, agregados pétreos, mezclas asfálticas, concreto asfáltico.

## ABSTRACT

The stone material is of vital importance for any type of construction, for this reason it is necessary to have a complete characterization of the material that can be found in the current concession areas of the Guatiquia river; in order to determine the suitability of the use of these materials since the quarries of this tributary are the most used in the municipality of Villavicencio-Meta.

This document presents in a logical and rational way the tests that will be performed on the samples obtained in certain concessioned places of the tributary, such as mercury intrusion porosimetry, X-ray diffractometry (XRD), X-ray fluorescence (XRF) and other necessary for a correct characterization of the materials.

**Keywords:** Building materials, stone aggregates, asphalt mixtures, asphalt concrete.



## GLOSARIO

- **Cantera:** Según el Código de Minas (Decreto 2655 de 1988) es el sistema de explotación a cielo abierto para extraer rocas o minerales no disgregados utilizados como materiales de construcción.
- **Caracterización:** Determina los rasgos distintivos de un objeto a estudiar de tal manera que se distinga de los demás. Determinando los atributos característicos que lo hagan diferenciarse (Ferreira Cuellar & Torres Lopez, 2014).
- **Difracción de rayos X (DRX):** Esta técnica permite determinar la estructura cristalina de los materiales al interactuar con los rayos X. Además, permite identificar y certificar gemas y joyas preciosas y semipreciosas y cuantificar la mineralogía de rocas, suelos, cementos, concretos, ladrillos, cerámicas, metales, productos sintéticos, productos industriales, materiales producidos por corrosión, materiales farmacéuticos, compuestos de detergentes y polímeros, tejidos óseos, margarinas, entre otros. Los análisis se pueden realizar a temperatura ambiente y a presión atmosférica en aire, o también a diferentes temperaturas (entre 20 ° C y 1600 °C) con diferentes gases a presión atmosférica en una cámara diseñada para tal fin. (gmas+Soluciones Geocientíficas, 2016).
- **La Fluorescencia de Rayos X (FRX):** es un proceso en el cual electrones son desplazados de sus posiciones orbitales emitiendo energía característica de un elemento específico. Con este método se puede analizar rocas, suelos, materiales de construcción y escorias de alto horno, realizar clasificación de chatarra, caracterizar productos farmacéuticos e identificar elementos como plomo en tuberías y contaminantes en suelos. Los resultados son presentados como porcentajes en peso de óxidos y/o elementos, con un margen de error de  $\pm 0.02$  % en peso. (gmas+Soluciones Geocientíficas, 2016).
- **Porosimetría de mercurio:** La porosimetría por inyección de Hg es una técnica utilizada en la caracterización del sistema macroporoso de los materiales. Se basa en la aplicación de presión y así forzar la entrada del mercurio en el entramado poroso del sólido. Esta técnica se utiliza en el estudio de materiales que presentan macroporos y mesoporos pudiendo llegar a medir poros de tamaño de hasta 6 nm; con este análisis se determina el área, el volumen de macro y mesoporos y se calcula la distribución de la porosidad del material. (INCAR, 2016).
- **La caracterización microestructural:** es una parte integral de la ciencia de los

materiales, considerándose como la observación y la descripción de la materia dentro de la escala comprendida entre las dimensiones atómicas hasta los componentes ingenieriles. (Segura Pérez & Moragues Terrados , 2012)

## INTRODUCCIÓN

El ejercicio ingenieril suele generar principalmente estructuras de diferentes índoles, sin embargo, todas suelen poseer determinadas características en común, una de las más importantes son las características propias de los agregados como lo son: la capacidad friccional, adsorción, porosidad y demás características que los elementos pétreos poseen. El material pétreo es entonces de vital importancia para cualquier tipo de construcción, por ello se hace necesario tener una completa caracterización del material que se puede encontrarse en las actuales zonas concesionadas del río Guatiquía; para así poder determinar la idoneidad de la utilización de estos materiales ya que las canteras de este afluente son de las más utilizadas en el municipio de Villavicencio-Meta.

El presente documento expone de manera lógica y racional los ensayos que se realizarán a las muestras obtenidas en ciertos lugares concesionados del afluente, ensayos como la porosimetría por intrusión de mercurio, Difractometría de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FRX) y demás necesarios para una correcta caracterización de los materiales.

De esta manera se logrará generar un documento completo que enmarque en su totalidad los aspectos relacionados con la propuesta de estudio, definiendo así su viabilidad e influencia dentro del ámbito de aplicación.

## **1. GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO**

La presente investigación se hará bajo los modelos establecidos dentro del Acuerdo No 242 del 23 de septiembre del año 2016 aprobado por el Consejo Superior de la Universidad Católica de Colombia, de tal manera que esta sea una muestra clara de la investigación que es realizada en la institución.

### **1.1. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN Y EJE TEMÁTICO**

#### **1.1.1. Línea de investigación**

Análisis de materiales pétreos por ensayos no convencionales.

#### **1.1.2. Eje temático**

Se ha optado por hacer uso de la línea de “Ciencia e Ingeniería de los Materiales” debido a que el eje central de nuestra propuesta es la realización más integra y completa de la caracterización de los materiales pétreos cuya cantera de extracción se encuentra situada en el río Guatiquía. Para los tres ensayos de caracterización se analizará la fracción gruesa del material expuesto por el río Guatiquía de la ciudad de Villavicencio.

### **1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **1.2.1. Problema a resolver**

Es necesario caracterizar el material que es extraído de las canteras del río Guatiquía, ya que al ser uno de los puntos de extracción principales del municipio de Villavicencio-Meta se hace vital y más que relevante generar material investigativo que dé a conocer lo más concretamente posible las características propias de este tipo de material, ya que de esta manera se asegura la calidad, idoneidad y funcionabilidad de los materiales ante los requerimientos o solicitudes que puedan tener.

#### **1.2.2. Antecedentes**

Luego de realizar la investigación pertinente, se pudo hallar como primer documento relacionado a la investigación que se está proponiendo el trabajo realizado por (Roper Angarita & Guzman Sarabia, 2014) titulado “Caracterización físico-mecánica de los agregados pétreos en el municipio de Ocaña” hacen una alusión a una caracterización no muy específica que se ha centrado en las propiedades físicas y en la relación de estas dentro de las solicitudes que puedan poseer, fue realizada en un municipio del Norte de Santander, en el mencionado se pudo apreciar que en cuanto a lo que tiene que ver con la funcionalidad de estos para su uso en

sistemas viales tienen mayor efectividad como material para mezclas asfálticas que para concretos hidráulicos.

Como segundo documento de referencia hallamos el realizado por (Lopez Garavito & Sepulveda, 2014) titulado “Caracterización física de diferentes muestras de agregados pétreos para el concreto - zona norte de Bogotá” estos autores llevan a cabo pruebas estandarizadas por el INVIAS que comprueban las aptitudes o capacidades físicas de los materiales con el fin de determinar su eficiencia ante las sollicitaciones o esfuerzos a los que se puedan exponer, es interesante a la conclusión que llegan estos autores debido a que hacen el apunte de que en la zona norte de la capital Colombiana hay existencia de proveedores cuyas malas prácticas comprometen seriamente la integridad y comportamiento de las estructuras que puedan llegar a construirse con ellos.

En el río que es objeto del estudio que se está proponiendo no se han realizado investigaciones superficiales como las que hemos tomado anteriormente como referencia, sin embargo, cabe mencionar que las canteras que comercializan el material extraído mediante la respectiva licencia deben de realizar las pruebas necesarias que certifiquen que dicho material cumple con la normativa nacional vigente.

### **1.2.3. Pregunta de investigación**

¿Es viable mediante una caracterización no convencional entender características propias del comportamiento del material pétreo obtenido en las canteras licenciadas del río Guatiquía?

### **1.2.4. Variables del problema**

La presente investigación tiene una gran cantidad de componentes que pueden influir de distintas maneras al momento de la realización de las pruebas.

- Accesibilidad a la muestra.
- Factores climatológicos.
- Cantidad de materia orgánica.
- Disposición del equipo necesario para los ensayos.
- Correcta realización de los ensayos.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Dentro de una construcción vertical u horizontal, los materiales de construcción básicos, tales como arena, grava, escombros y piedras, pueden representar hasta el 5 % del total de los costos. Dado que los agregados pétreos constituyen un insumo fundamental para la construcción

y a su vez ésta es una de las principales fuentes de crecimiento económico y por tanto de bienestar para la sociedad, es importante tener en cuenta la eficiencia en el uso de estos. De este modo como base principal de este trabajo una vez se haya hecho la identificación de las características propias del material se dispone evaluar y definir para que tipos de construcciones es viable su utilización, debido a que dependiendo del tipo de cantera y localización las propiedades varían y se diversifican unas de otras, además que, con el tiempo de extracción de estas mismas, las partículas a evaluar van cambiando sus propiedades iniciales.

#### **1.4. OBJETIVOS**

##### **1.4.1. General**

Caracterizar mediante ensayos especializados el material pétreo explotado en las canteras licenciadas del río Guatiquía en el municipio de Villavicencio-Meta.

##### **1.4.2. Específicos**

- Consultar exhaustivamente ensayos e información especializada en la caracterización de materiales pétreos.
- Caracterizar el material de la muestra mineralógicamente, porosiméricamente y microestructuralmente mediante ensayos de Difractometría de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FRX) y porosimetría por inyección de mercurio.
- Abalizar e interrelacionar la información obtenida mediante los ensayos efectuados al material pétreo obtenido del río Guatiquía.

Tabla 1. Presupuesto global de la propuesta por fuentes de financiación (en miles de \$).

[illegible]

## 1.6 Presupuesto

Tabla 2. Presupuesto global de la propuesta por fuentes de financiación (en miles de \$).

<b>RUBROS</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
Personal	N/A	Ad Honorem
Equipos	N/A	\$ 300.000
Materiales	N/A	\$ 250.000
Material Bibliográfico	N/A	\$ 100.000
Servicios Técnicos	N/A	\$ 70.000
Viajes	N/A	\$ 170.000
Laboratorios	N/A	\$1.500.000
Administración	N/A	\$ 125.000
<b>TOTAL</b>		\$2.515.000

Tabla 2. Descripción y cuantificación de los equipos de uso propio (en miles de \$)

<b>EQUIPO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
COMPUTADOR PORTATIL	\$ 1.800.000
CAMARA FOTOGRAFICA	\$ 230.000
<b>TOTAL</b>	\$ 2.030.000

Tabla 3. Descripción y justificación de los viajes (en miles de \$).

<b>LUGAR / NO. DE VIAJES</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>PASAJES (\$)</b>	<b>ESTADÍA (\$)</b>	<b>TOTAL DÍAS</b>	<b>TOTAL</b>
Cantera Guatiquía/ 2	Recolección del material para ensayos	\$ 15.000	\$ 00.000	0	\$ 60.000
Bogotá/ 16	Ejecución del proyecto	\$ 30.000	\$ 50.000	32	\$ 1.920.800
Bogotá/ 12	Realización de los ensayos	\$ 30.000	\$ 50.000	12	\$ 1.320.000
<b>TOTAL</b>					\$ 3.300.800

Tabla 4. Materiales y suministros (en miles de \$)

<b>MATERIALES</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
Internet	Revisión bibliográfica	\$ 94.000
Impresiones	Informe final	\$ 150.000
Fotocopias	Revisión de bibliografía	\$ 60.000
<b>TOTAL</b>		\$ 304.000

Nota: Formato utilizado por Colciencias.



## 2. MARCOS DE REFERENCIA

### 2.1. MARCO TEÓRICO

#### 2.1.1 Caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica puede realizarse de muchas maneras. Melgarejo, Proenza, Gali, & Llovet (2010) mencionan en su artículo *Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera* varios tipos de ensayos que se pueden realizar, estos son relacionados a continuación:

- La difracción de polvo es un método de análisis estructural, que permite identificar los minerales por su estructura cristalina.
- El microscopio electrónico de barrido (scanning electron microscope, SEM) se basa en la obtención de una imagen de la muestra a partir del barrido de la misma con un haz de electrones, como resultado de las interacciones entre los electrones incidentes y la muestra.
- Aunque la catodoluminiscencia es una herramienta muchísimo más utilizada en exploración de cuencas petrolíferas, su potencial en la exploración minera es importante y no debe ser pasado por alto.
- La microsonda electrónica es el método más utilizado actualmente para el análisis químico puntual rutinario de minerales.
- El micro-PIXE es una microsonda protónica. Se analizan los rayos X producidos al bombardear una muestra mediante un haz de protones que puede ser focalizado a escala micrométrica.
- Secondary-ion mass spectrometry... se basa en bombardear la muestra con un haz de partículas cargadas (iones primarios); los iones arrancados de la muestra (iones secundarios) son analizados mediante un espectrómetro de masas. El método permite enfocar el haz hasta unas 10 micras de diámetro, por lo que es usado para analizar elementos traza o isótopos en minerales zonados, granos individuales de pequeño tamaño, etc.
- Laser ablation microprobe + inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS);...se basa en usar un láser para arrancar por ablación (sublimación) los elementos de la muestra. El haz puede ser diafragmado hasta excitar superficies muy pequeñas (del orden de pocas decenas de micras,  $\sim 10 \mu\text{m}$ ). El plasma así obtenido es analizado en un

ICP, que disocia e ioniza el material arrancado de la muestra y transportado por una corriente de Ar, y un espectrómetro de masas (MS), que analiza las diferencias de masas de los iones producidos.

- Difracción cuantitativa de rayos X... Esta técnica puede ser una herramienta muy poderosa si es complementada eficazmente con estudios texturales con microscopía óptica de luz transmitida-reflejada, microscopía electrónica de barrido con análisis de energías y micro sonda electrónica. De este modo, si conocemos la composición química de cada una de las fases minerales presentes en una mezcla, con ayuda de programas adecuados de tratamiento de los diagramas de polvo de rayos X pueden obtenerse con mucha precisión las proporciones en que se encuentre cada uno de estos minerales en la roca.

En la actualidad el tipo de caracterización mineralógica propuesta tiene más que ver con el área de la geología que con la propia área de los pavimentos, esto debido a el análisis realizado exhaustivo realizado a los materiales, un claro ejemplo de ello son los usos que la NASA ha dado al equipo de DRX-FRX. Rull Perez (2010) menciona que este equipo “...es una versión comercial portátil del instrumento CheMin desarrollado para la misión Mars Science Laboratory (MSL) de la NASA...” lo que sugiere que este tipo de ensayos no solo son usados para el área de pavimentos como se ha mencionado con anterioridad.

Por otra parte, también es usado para la caracterización en la industria minera, como lo evidencia. Ojeda Escamilla, Reyes Bahena, & Aragon Piñas (2010) en su documento *Caracterización mineralógica en la industria minera* mencionando que este tipo de estudio es “...un conjunto de técnicas empleadas para conocer la mineralogía de una muestra y poder identificar minerales de interés...”

### **2.1.2 Análisis petrográficos**

El análisis petrográfico proporciona la identificación de los tipos y variedades de rocas presentes en los agregados potenciales. También, los minerales presentes en la muestra. Puede enfocarse específicamente a evaluar la posible presencia de material contaminante en los agregados, como vidrio sintético, carbonillas, escorias o la ceniza del carbón, óxido de magnesio, óxido de calcio, o ambos; la suciedad, hidrocarburos, químicos que pueden afectar la conducta del concreto o las propiedades del agregado, excremento animal, plantas o vegetación podrida y la reacción álcali-agregado, que se origina entre determinados agregados activos y los óxidos de

sodio y potasio del cemento. La reacción se inicia en la superficie del agregado y se produce en la interfase con la pasta de cementos formando un gel que toma agua y se dilata creando presiones internas que llevan a la rotura del material y comprende los siguientes sistemas, reacción álcali-sílice, reacción álcali-silicato y la reacción álcali carbonato. (Torrence & Germaine 2003).

### **2.1.3 Porosimetría**

La caracterización de los materiales porosos implica normalmente la determinación del volumen total de poros o porosidad así como de la curva de distribución de tamaño de poro. En ocasiones, también puede ser necesario estudiar la morfología de los poros y su interconectividad o determinar su superficie específica interna y externa. (Ferreira & Torres, 2014).

La técnica de porosimetría por intrusión de mercurio es definida por Benito, Paz, & Pini (2010) como “...una técnica adecuada y fiable para el análisis de la porosidad y distribución dimensional de los poros del suelo...” lo que nos indica que es un método idóneo para la obtención de la información que requerimos para el presente trabajo investigativo.

## **2.2 MARCO TECNOLÓGICO**

Para la caracterización no convencional de los agregados pétreos se utilizan herramientas tecnológicas en laboratorios especializados en geología o suelos para realizar los ensayos.

La nación chilena tiene mucho que ver con el entendimiento de los minerales que componen su suelo y el material pétreo usado para la construcción, debido a la cantidad tan grande de sismos que tienen a diario y en el transcurso del ciclo solar.

### **2.2.1 Fluorescencia de rayos X**

La fluorescencia de rayos X (XRF) es un fenómeno en el cual, mediante la incidencia de rayos X sobre la muestra, se logra sacar un electrón de los niveles de energía más bajo del átomo el cual es reemplazado por un electrón de un nivel energético mayor. Esta diferencia de energía genera la emisión de un fotón de rayos X. Este fotón fluorescente es característico de cada elemento y la medición de su energía determina al elemento que lo emitió y la intensidad de los fotones indica la concentración de cada elemento. Dentro de sus limitaciones se encuentra el hecho de que detecta desde el Boro en adelante, y sus límites de detección son mayores para elementos livianos y menores para elementos pesados... (Benito, Paz, & Pini, 2010, p. 23).

### **2.2.2 Difracción de rayos X**

La difracción de rayos X (XRD) consiste en el bombardeo de rayos X a una muestra, cuya preparación involucra la conminución de la misma para que los granos queden orientados en distintas direcciones. Los rayos X se difractan según la ley de 2 $\theta$  Bragg y se registran los peaks de difracción. Cada fase cristalina tiene un espectro de difracción característico, por lo que quedan caracterizadas siempre y cuando no se produzcan problemas como el solapamiento de peaks o el efecto matriz, donde una fase altamente cristalina oscurece a una pobremente cristalina... (Benito, Paz, & Pini, 2010, p. 23-24).

### **2.2.3 Microscopia**

También Contreras Torres (2015) hace claridad sobre la microscopia definiendo dos métodos para su determinación, estos son entonces:

- Luz transmitida: El análisis de cortes transparentes se basa en el paso de luz polarizada por los granos minerales, una vez que la luz pasa por ellos vuelve a vibrar en varias direcciones.
- Luz reflejada: Los minerales de mena deben ser analizados en un microscopio de luz reflejada. Su funcionamiento se basa en la iluminación de la muestra desde arriba para permitir la examinación de la luz reflejada por las superficies pulidas.

## **2.3 MARCO JURÍDICO**

El marco normativo de la actividad minera en Colombia está dado por el Código de Minas, Ley 685 de 2001, que regula todas las actividades desde las fases de exploración, explotación hasta el cierre de minas. En la parte técnica se complementa con las guías minero ambientales que son una herramienta de consulta y orientación, conceptual y metodológica para mejorar la gestión y desempeño minero-ambiental y que además se encuentra amparado por la resolución 180861 de 2002. (Ramírez Rojas, 2008).

Sus objetivos son:

- Fomentar la exploración técnica y la explotación de recursos mineros estatales y privados.
- Estimular las actividades de exploración y explotación minera con el fin de satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de las mismas.
- Incentivar el aprovechamiento racional de los recursos mineros de manera que armonice con los principios y normas de explotación de los recursos naturales no renovables.

- Promover tanto el aprovechamiento de los recursos mineros dentro del concepto integral de desarrollo sostenible, como el fortalecimiento económico y social del país. El Código "regula las relaciones jurídicas del Estado con los particulares y las de estos entre sí, por causa de los trabajos y obras de la industria minera en sus fases de prospección, exploración, construcción y montaje, explotación, beneficio, transformación, transporte y promoción de minerales que se encuentren en el suelo o subsuelo, ya sea de propiedad nacional o propiedad privada"...

Estas guías se usan con el propósito de introducir al concesionario en los aspectos pertinentes al desarrollo de un proyecto minero de una forma técnica, sostenible y ambientalmente viable y de acuerdo al marco legal colombiano, así pues, según la presente Ley:

Materiales de construcción. Para todos los efectos legales se consideran materiales de construcción, los productos pétreos explotados en minas y canteras usados, generalmente, en la industria de la construcción como agregados en la fabricación de piezas de concreto, morteros, pavimentos, obras de tierra y otros productos similares. También, para los mismos efectos, son materiales de construcción, los materiales de arrastre tales como arenas, gravas y las piedras yacentes en el cauce y orillas de las corrientes de agua, vegas de inundación y otros terrenos aluviales... (Art. 11).

En conjunto con el Código de Minas se adjunta la reglamentación por el Ministerio del Medio Ambiente a través de su política de gestión y concertación intersectorial que ha buscado la concurrencia y participación de las Autoridades Ambientales Regionales, de las entidades del Sector Minero, Subsector Materiales de Construcción – Canteras –, y del Sector Privado, con el propósito de obtener esta Guía que pretende ser el primer acercamiento para sensibilizar y orientar a los industriales del Sector interesados en mejorar su gestión ambiental y ampliar los beneficios económicos, sociales y ambientales de su empresa, poniendo en práctica los principios de autorregulación, ecoeficiencia y desarrollo sostenible. La Guía Ambiental para Actividades del Subsector de Materiales de Construcción – Canteras -, Fase de Explotación (GMCE), se concibe como una herramienta práctica que además de orientar, pretende unificar criterios en la gestión ambiental de proyectos de explotación minera. (Minambiente, 1998).

En la actualidad la extracción de material pétreo del río Guatiquía se rige bajo el contrato de concesión EKS – 151 a cargo del titular Yesid Romero Romero quien extrae 48.000 m<sup>3</sup> anuales de material. Cuyo permiso esta denominado bajos las siguientes resoluciones:

- Resolución 2604504 del 04 de octubre de 2004 por el cual se adopta el Plan de Manejo Ambiental de Minería de Hecho adoptado (PMA) EN LA MIA DEL Guatiquía
- Resolución 2605826 del 06 de septiembre de 2005 por la cual se hacen recomendaciones necesarias
- Resolución 2605827 del 06 de septiembre de 2005 por el cual se adoptan las modificaciones al documento plan de compensación paisajista.

## **2.4 MARCO GEOGRÁFICO**

El área en la cual se ejecutará el proyecto se centra específicamente al cauce del río Guatiquía. Este afluente nace en el Parque Nacional Natural Chingaza y desemboca en el río Metica.

La información a continuación presentada es tomada de la Alcaldía de Villavicencio (2017).

El Meta es uno de los 32 departamentos de Colombia, su capital es la ciudad de Villavicencio, ubicado sobre la cordillera Oriental y caracterizado en la zona central del país pues Puerto López, ombligo de Colombia es parte de este departamento, lo que permite que sea muy prestigioso para sus habitantes y turistas por su cercanía con la ciudad capital y demás departamentos; además posee con la fortuna de tener numerosos afluentes del río Orinoco que atraviesan el departamento y que brotan en la Cordillera Oriental, entre los cuales encontramos el río Negro; que aunque no es río principal ni fuente minera hasta el momento puede llegarse a convertir en una, ya que este río es brazo del río Guayuriba, principal fuente de nuestro departamento, además si llegase a cumplir con todas las Normas exigidas, se beneficiaría tanto el departamento como todas las empresas constructoras de obras civiles, pues es de gran conocimiento que en nuestro departamento es utilizado gran cantidad de los materiales para la construcción.

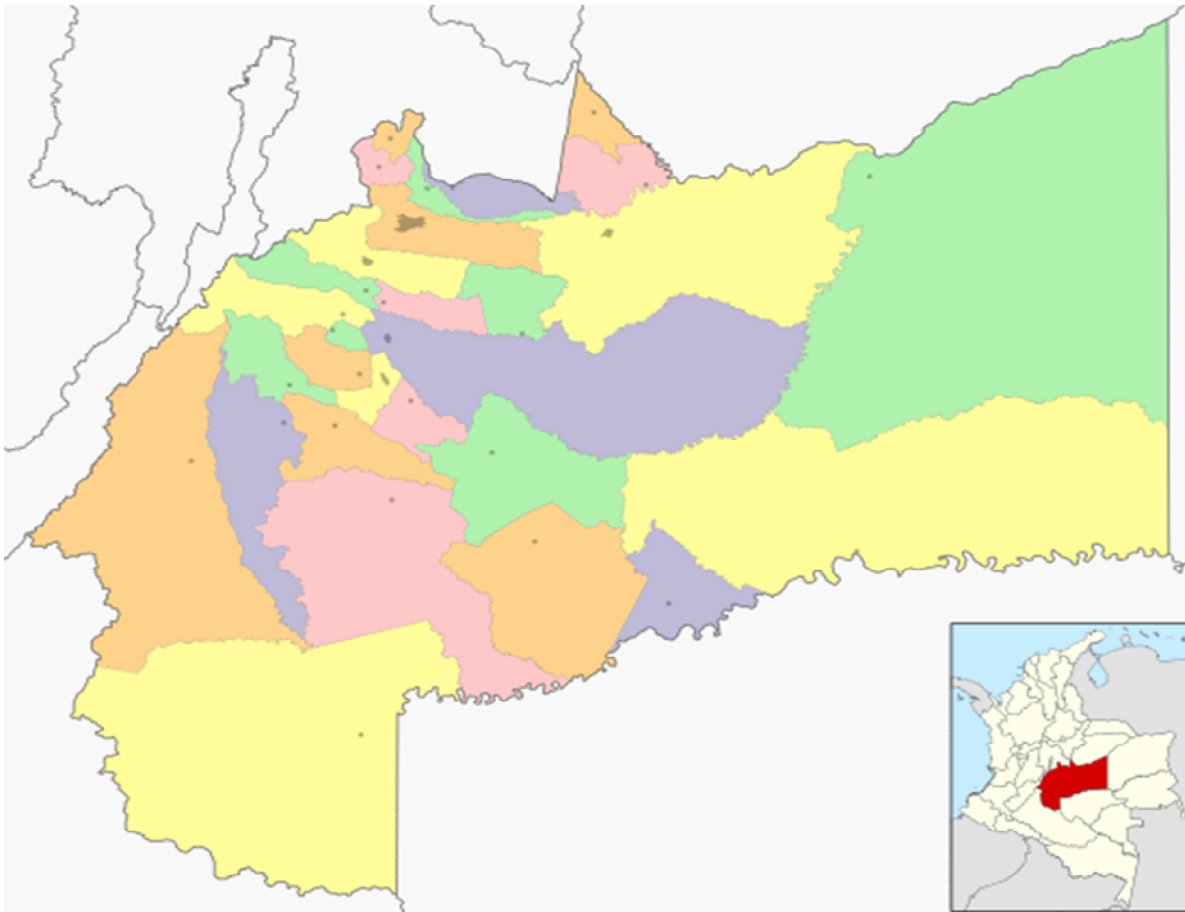


Ilustración 1. Ubicación geográfica del departamento del Meta

Fuente: Wikipedia (2018).

En cuanto al municipio de Villavicencio es el mayor núcleo poblacional, económico, administrativo y cultural de los Llanos Orientales de allí que se le llame Puerta del Llano. Está situada al noroccidente del departamento del Meta, en el piedemonte de la cordillera Oriental en la margen izquierda del río Guatiquía, localizada a los 04° 09' 12" de Latitud Norte y 73° 38' 06" de Longitud Oeste y a una altura de 467 metros sobre el nivel del mar, es la ciudad más grande de la región Oriental y la primera fuente comercial y de abastecimiento para la región. Villavicencio limita con varios de los municipios principales del Departamento como lo es Puerto López, Restrepo, Acacias y San Carlos de Guaroa.

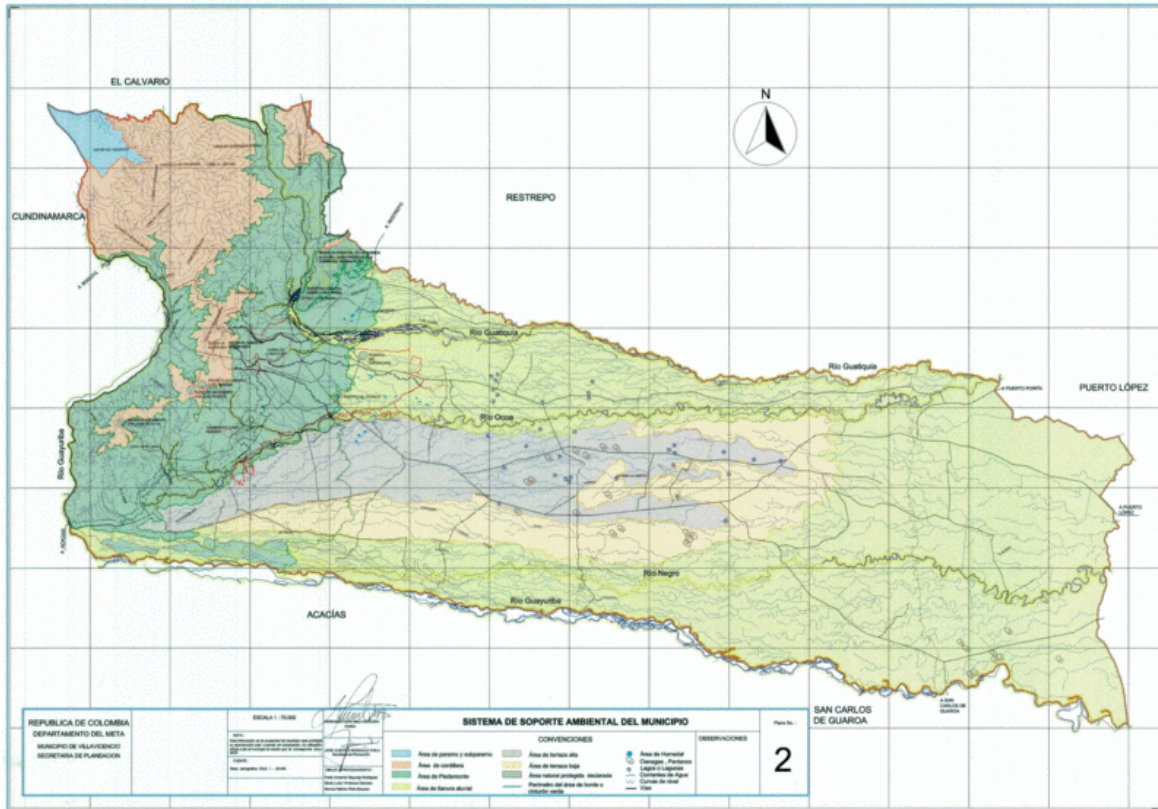


Ilustración 2 Municipio de Villavicencio

Fuente: villavicencio.wikispaces.com (2018)

Su economía está caracterizada por los sectores agrícola, comercial e industrial. También hacen presencia algunos molinos de arroz en el contorno de la ciudad, en la actualidad se le está dando un gran impulso al turismo y durante los últimos años se han venido realizando grandes construcciones de Centros Comerciales y mejoramiento de la infraestructura vial del Municipio, mencionando la doble calzada Villavicencio-Bogotá que ahorrará en gran parte el trayecto a la ciudad Capital y la doble calzada Villavicencio-Acacias.



### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 FASE PRELIMINAR

La fase preliminar se basó en la exploración y recopilación de bibliografía, teniendo en cuenta autores especializados en el tema, estados del arte, artículos y normatividad existente en la caracterización mineralógica, química y porosimétrica de agregados pétreos utilizados en vías.

#### 3.2 FASES DE CAMPO E IDENTIFICACIÓN

Esta fase inicia con la extracción de la muestra en la cantera localizada en el departamento del Meta en el río Guatiquía. Allí se recopiló la información geológica de esta fuente y el tipo de agregado existente. El material suministrado de esta cantera es comúnmente utilizado para mezclas asfálticas, bases y subbases.

#### 3.3 FASE DE ENSAYOS APLICADOS A LA MUESTRA.

##### 3.3.1 Fluorescencia de rayos X (FRX)

Procedimiento de preparación: Las muestras son secadas a 105°C por un periodo de 12 horas. Cuando el material es demasiado grueso y su granulometría no es homogénea, esta se reduce con un molino de bolas de ágata. Las muestras son homogenizadas por agitación y se preparan en forma de pastillas con relación muestra-cera espectrométrica Merck, de 1:10. Posteriormente las muestras son llevadas a una prensa hidráulica a 120 kN por 1 minuto. De este modo se obtiene una pastilla de 37 mm de diámetro para ser medida en una aplicación semicuantitativa o cuantitativa.

Las pérdidas por calcinación (L.O.I. por sus siglas en inglés Loss On Ignition) representan la cantidad de componentes volátiles (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, F, Cl y S) y materia orgánica no detectados con el equipo de fluorescencia. El proceso de calcinación consiste en llevar la muestra a 1000°C, y mantenerla a esa temperatura durante 1 hora, para evaluar el % en peso perdido de muestra.

El análisis cuantitativo se realizó con el software SemiQ 5, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos.

##### 3.3.1.1 Instrumentación y parámetros.

- EQUIPO: MagixPro PW – 2440 Philips
- TUBO: Objetivo de Rh con Voltaje máximo de 4KW
- Sensibilidad: 100ppm (0.01%) en la detección de elementos pesados metálicos.

- VACÍO: Bomba portátil para aumentar la sensibilidad en la detección de elementos ligeros.

### 3.3.2 Difracción de rayos X (DRX)

*3.3.2.1 Procedimiento de preparación.* Previo a la preparación del montaje en polvo se pulverizó y tamizó la muestra para obtener un tamaño de partícula menor a 63 micras. Para la selección de la porción utilizada en el análisis de difracción, se cuarteó la muestra hasta obtener un peso de aproximadamente 2g. A continuación se describe el montaje en polvo utilizado en el presente informe para el análisis de las muestras.

- **Montaje en polvo.** La mineralogía principal de una muestra puede ser determinada mediante difracción de rayos X analizando un montaje en polvo. Este tipo de preparación garantiza que los rayos X tengan la misma oportunidad de incidir en cualquier plano cristalino de los minerales al estar orientados al azar los cristales de estos. Sin embargo, minerales con un hábito cristalino laminar tienden a orientarse preferentemente, fenómeno tenido en cuenta a la hora de la interpretación.

El procedimiento descrito por Zhang et al. (2003) consiste en distribuir la muestra, previamente pulverizada, en el portamuestras con una lámina de metal afilada mediante movimientos verticales (40-50 veces). Luego debe removerse el polvo excedente activando una pistola de aire a ~0.5 m de distancia del portamuestras.

#### *3.3.2.2 Instrumentación y parámetros.*

- Difractómetro Bruker D8 Advance - Serie I
- Detector LYNXEYE
- Tubo de rayos-X Co (K alpha  $\lambda = 1.7890$ )
- Filtro de Níquel
- 35KV 30mA
- Muestras en polvo:  $2\theta$ : 5-70° (montaje polvo)
- Tamaño del paso: 0.015
- Velocidad de barrido: 0.3 segundos por paso.

### 3.3.3 Microscopia de barrido (SEM)

*3.3.3.1 Procedimiento.* La muestra entregada fue cuarteada para tener un resultado estadísticamente confiable. Dado el tamaño de las muestras y su coloración similar no se realizó un agrupamiento de las muestras por características macroscópicas. Con los fragmentos

resultantes del cuarteo se realizó un montaje rectangular de 4.7 cm x 2.5 cm con resina transparente. El montaje se recubrió con grafito, para crear una película conductora y poder analizarlo en el microscopio electrónico de barrido (SEM) en modo de alto vacío.

*3.3.3.2 Instrumentación y parámetros.* El análisis se realizó en un SEM marca JEOL modelo JSM 6490-LV, con un voltaje de aceleración de 15 KV en alto vacío a una distancia de trabajo de 15mm aproximadamente. Las micrografías fueron tomadas con un detector de electrones retro dispersados (BSE) y los espectros de energía dispersiva de rayos x (EDX), para el análisis elemental se obtuvieron con un tiempo de detección de rayos x de 60 segundos. La Ilustración 1 muestra el montaje realizados junto con el recubrimiento con grafito.



Ilustración 3. Montajes con granos después del metalizado con grafito.

Fuente: los autores

### **3.4 FASES DE CARACTERIZACIÓN**

Mediante los ensayos mencionados anteriormente se realizó la caracterización sobre las partículas del material tomado del río Guatiquía; de este modo se identificó las propiedades químicas, porosidad y mineralogía del material de la cantera.

### **3.5 FASE DE ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO FINAL**

En este documento final encontramos todo el proceso de investigación que nos dirigió al análisis definitivo de los resultados. Este documento incluye la fase de investigación del marco teórico, la metodología de trabajo, el análisis de resultados y conclusiones.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

##### 4.1 FLUORESCENCIA POR RAYOS X (FRX)

Mediante ensayo se detectaron los elementos y/o compuestos existentes en la cantera del río Guatiquía. De los resultados obtenidos el mayor porcentaje en peso, sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en un 76,75%, lo cual indica que el comportamiento del agregado pétreo en estudio, será un comportamiento asociado a las características físicas, mecánicas y químicas de este mineral; seguido de óxido de aluminio en un 11,44% ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Óxido ferroso ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en un 5,46. Los demás elementos presentes se encuentran en porcentajes bajos poco representativos de la muestra. Los resultados presentados se transcriben a continuación en la ilustración 4.

<b>Muestra CL</b>	
<b>Elemento y/o Compuesto</b>	<b>% en peso</b>
$\text{SiO}_2$	76,75
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11,44
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,46
$\text{K}_2\text{O}$	1,87
$\text{Na}_2\text{O}$	1,10
$\text{MgO}$	1,05
$\text{CaO}$	0,62
$\text{SO}_3$	0,57
$\text{TiO}_2$	0,55
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,16
$\text{MnO}$	0,06
Ba	0,05
Cl	0,03
Cr	0,03
Zr	0,03
Nb	0,02
Ta	0,02
Rb	<b>78 ppm</b>
Ni	<b>65 ppm</b>
Zn	<b>56 ppm</b>
Sr	<b>45 ppm</b>
Y	<b>38 ppm</b>
L.O.I.	0,15

Ilustración 4. Resultados de FRX para la muestra "M-1".

Fuente: los autores

Con este resultado Se afirma que el agregado analizado aportaría gran resistencia mecánica a una mezcla debido a su composición mineralógica ( $\text{SiO}_2$ ), que le otorga la mayor dureza que alcanzan los materiales usados en construcción según la escala de Mohs, con un valor de siete

(7), así como una baja susceptibilidad química. Lo anterior se traduce en un excelente comportamiento ante la acción de los agentes atmosféricos.

## 4.2 DIFRACCIÓN POR RAYOS X (DRX)

Del análisis de los montajes en polvo de la muestra de la cantera de la sabana se presenta los difractogramas que muestran los resultados de la difracción por rayos X. De los difractogramas, la abscisa “Counts” corresponde a las intensidades de cada pico difractado, y la ordenada y la ordenada que muestra el ángulo  $2\theta$  ( $2\theta$ ) de acuerdo a la ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \text{ (Bragg, 1910)}$$

Donde,

$n$  es un entero positivo.

$\lambda$  es la longitud de onda de la onda incidente (LW)

$d$  es la distancia interplanar

$\theta$  es el ángulo de difracción

Bragg (1910) demostró que existe una relación entre la distancia interplanar “ $d$ ” en la estructura cristalina de un mineral, o minerales, y el seno del ángulo “ $\theta$ ”. La intensidad del o altura del pico en el eje y depende de la estructura cristalina y la cantidad de cada mineral presente en la muestra.

### 4.2.1 Montaje en polvo

La tabla n° 6 muestra el porcentaje en peso de cada fase mineral identificada en el montaje en polvo de la muestra. Los resultados obtenidos tienen una incertidumbre de  $\pm 2\%$

Mineral (% peso)	Fórmula Química	FP-1
Cuarzo	$\text{SiO}_2$	83%
Moscovita M2	$\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	17%

Tabla 5. Porcentaje en peso (% peso) de cada fase mineral identificada en la muestra.

Fuente: los autores

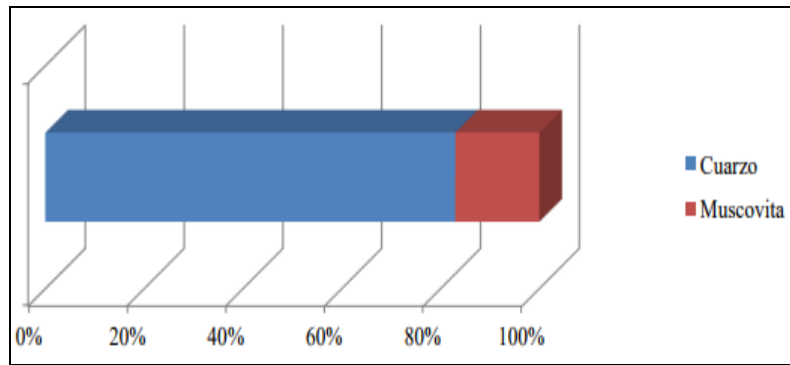


Ilustración 5. Proporción mineralógica de las muestras

Fuente: los autores

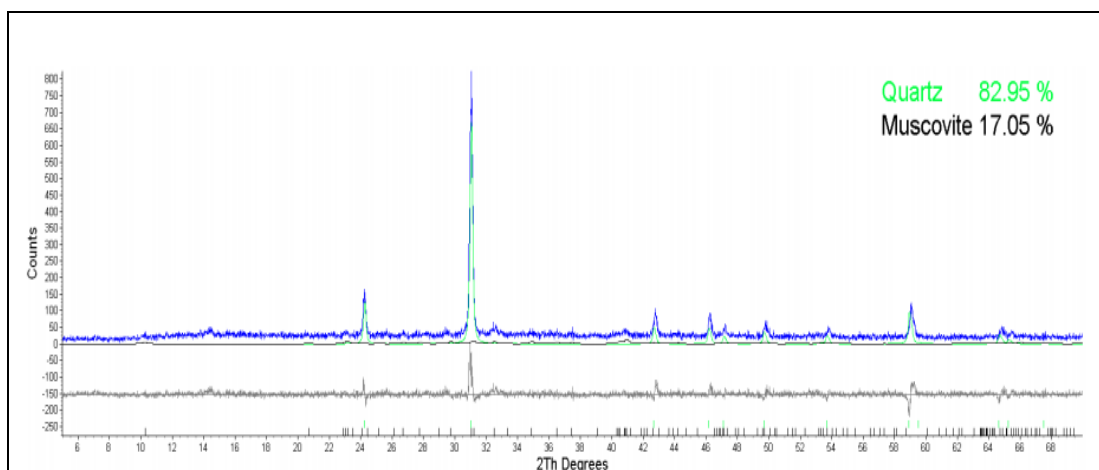


Ilustración 6. Difractograma 1. Muestra 1 en polvo

Fuente: los autores

Los diferentes picos detectados son las reflexiones de los planos en cada fase mineral, los cuales son comparados con una base de datos (Brucker). La cuantificación es realizada con el software TOPAS, el cual opera bajo el método de refinamiento Rietveld y una optimización por mínimos cuadrados. La función matemática que simula el difractograma tiene en cuenta tanto los parámetros de escala, que describen el “background” y las formas de los picos, como las contribuciones del instrumento y orientaciones preferentes.

#### 4.3 MICROSCOPIA DE BARRIDO (SEM)

El resultado de la microscopia de barrido para la muestra de análisis de la cantera del río Guatiquía se evidencia en dos fases. En la primera fase se presenta los resultados porosimetría y la segunda fase los resultados de la composición mineralógica por cada tipo de grano encontrado por medio micrografías a 50, 200 y 500 micrómetros.

### 4.3.1 Resultados porosimetría

Los resultados de esta primera fase se realizó toma de datos en 4 tipos de granos observados en la muestra y a cada uno de ellos se le realizó un cálculo de porosidad.

El procesamiento de cada micrografía se realizó empleando el programa IMAGE J, el cual colorea de rojo los poros (espacio interpartícula e intrapartícula) y microfracturas. En algunas imágenes parte del área analizada corresponde a la resina utilizada en la fabricación del montaje, por lo tanto el área porosa fue recalculada sobre el área que corresponde únicamente a la muestra. A continuación, se presenta este procedimiento para cada uno de los tipos de granos con los resultados de porosidad para cada tipo.

*4.3.1.1 Grano Tipo 1.* En esta micrografía tomada a 50 micrómetros (ilustración 7) se observa del grano tipo 1. Se observa el área porosa resaltada en rojo y cuenta en promedio de 0,77%. Los resultados de los porcentajes del área porosa se ven en la tabla 7. De los resultados se determinó que el grano tipo 1 está compuesto por minerales de cuarzo y óxido de hierro. Este tipo de grano con el grano tipo 4 son los que presenta mayor área de porosidad.

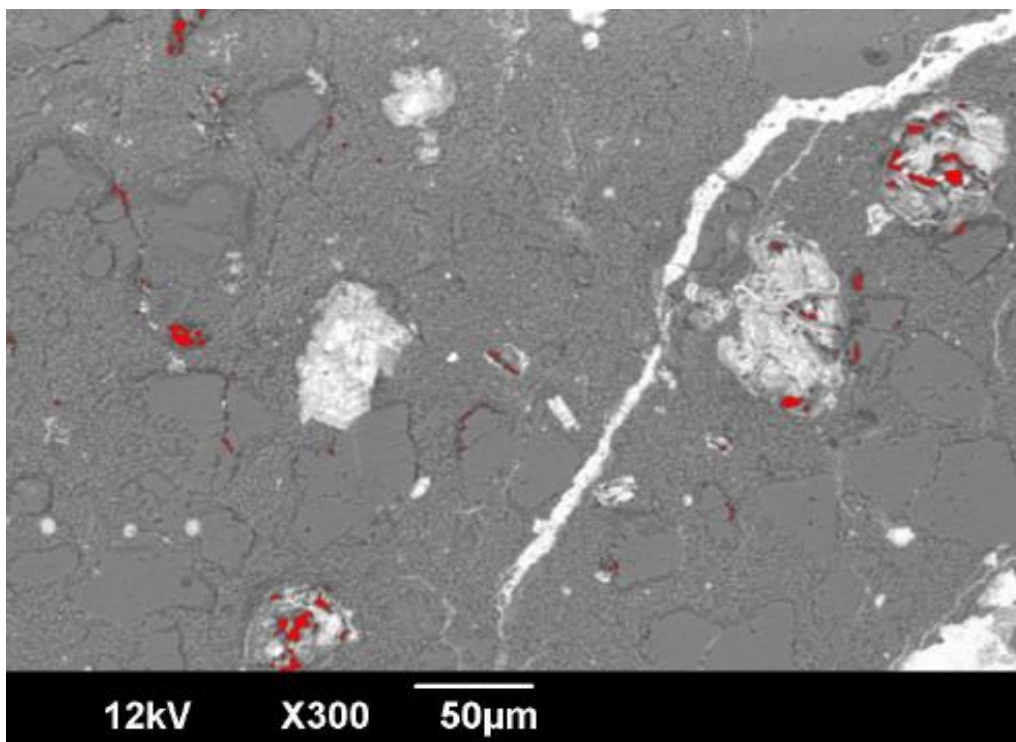


Ilustración 7. Micrografía grano tipo 1. Cálculo de área porosa

Fuente: los autores

IMAGEN	% POROSIDAD
G 1 1	0,85%
G 1 2	1,08%
G 1 3	0,75%
G 1 4	0,40%
<b>Promedio</b>	<b>0,77%</b>

Tabla 6. % Área porosa Grano Tipo 1.

Fuente: los autores

4.3.1.2 *Grano Tipo 2*. En el grano tipo 2 se observa laminaciones a 500 micrómetros en la micrografía (ilustración 8). En este tipo de grano no se determinó porosidad como lo muestra la tabla 8. De los minerales detectados por este tipo de grano se encontró caolinita.

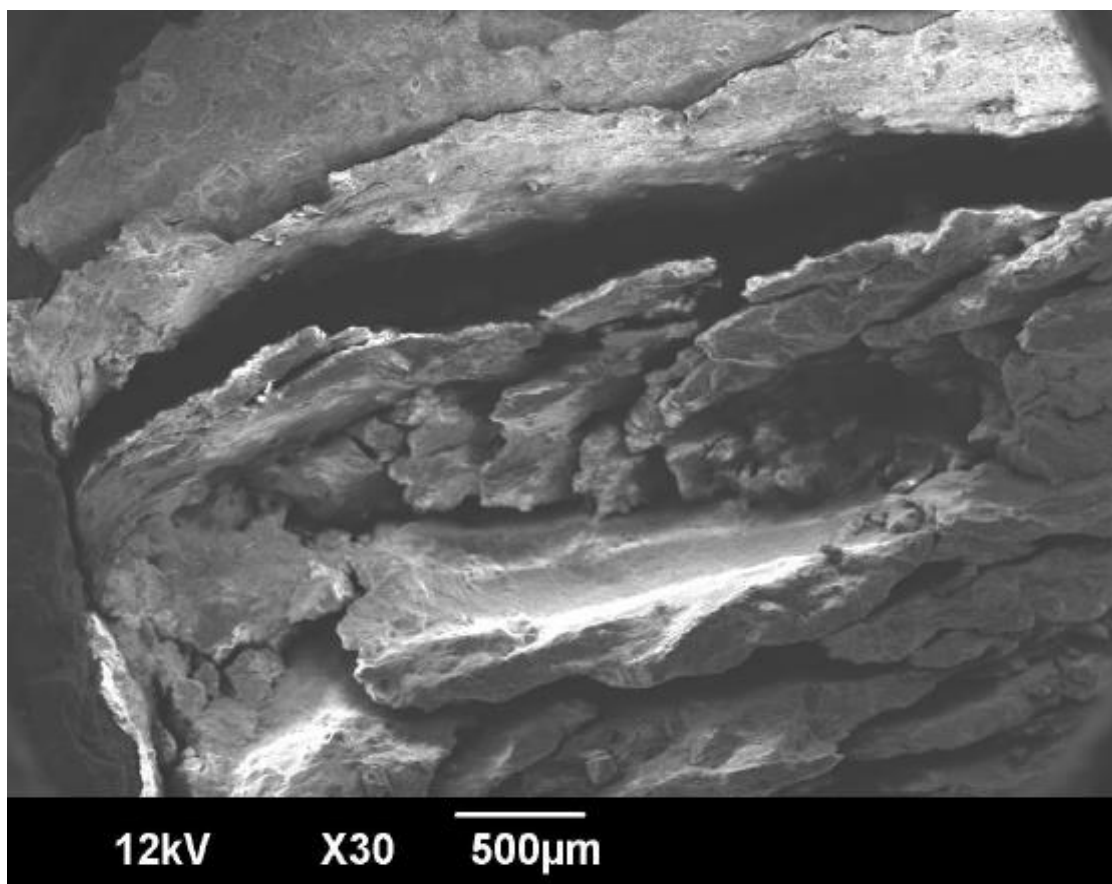


Ilustración 8. Micrografía grano tipo 2. Ejemplo cálculo de área porosa.

Fuente: los autores



IMAGEN	% POROSIDAD
G 2 1	0,00%
G 2 2	0,00%
G 2 3	0,00%
<b>Promedio</b>	<b>0,00%</b>

Tabla 7. % Área porosa Grano Tipo 2.

Fuente: los autores.

4.3.1.3 *Grano Tipo 3*. La micrografía de grano tipo 3 (Ilustración 9) tomada a 200 micrómetros, se observa un área porosa del 0,07% (Tabla 9). Este tipo de grano está compuesto por Caolinita, Cuarzo, circón y Rutilio.

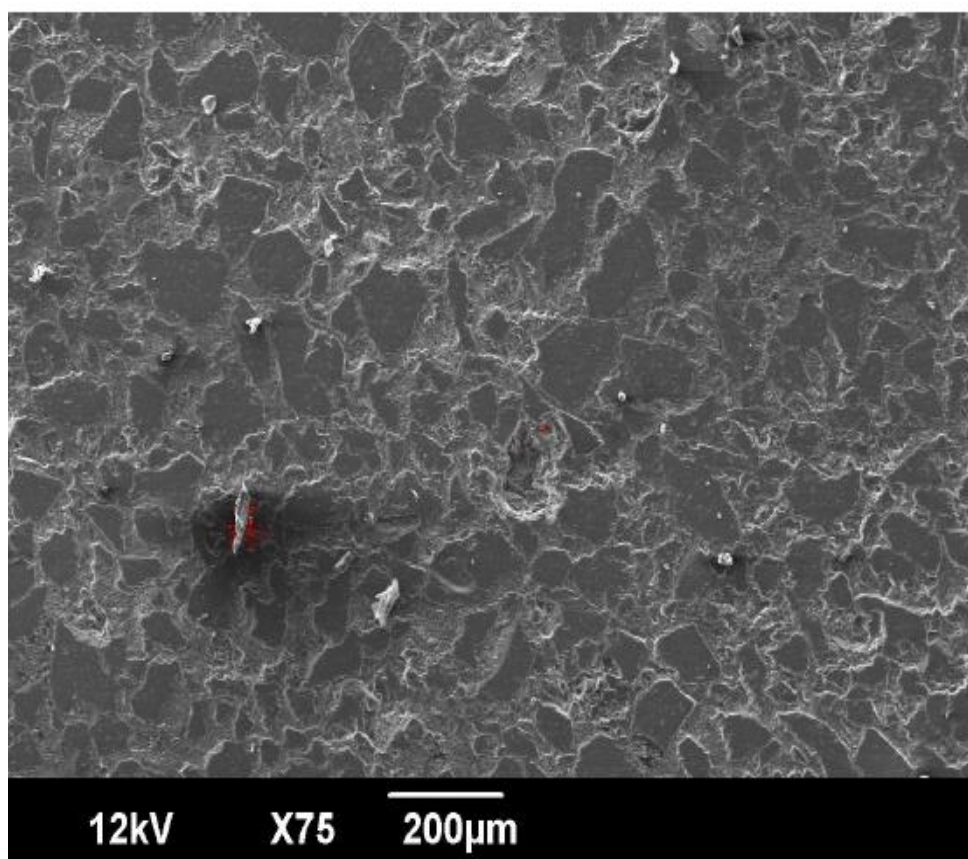


Ilustración 9. Micrografía grano tipo 3. Ejemplo cálculo de área porosa.

Fuente: los autores

IMAGEN	% POROSIDAD
G 3 1	0,10%
G 3 2	0,10%
G 3 3	0,00%
<b>Promedio</b>	<b>0,07%</b>

Tabla 8. % Área porosa Grano Tipo 3.

Fuente: los autores

4.3.1.4 *Grano Tipo 4*. El grano tipo 4 se observa mayor área porosa a 200 micrómetros en la micrografía (ilustración 10). En este tipo de grano cuenta con mayor porcentaje de área porosa que los demás tipos de granos con un promedio de 1,69%. De los minerales detectados por este tipo de grano se encontró caolinita, cuarzo y circon.

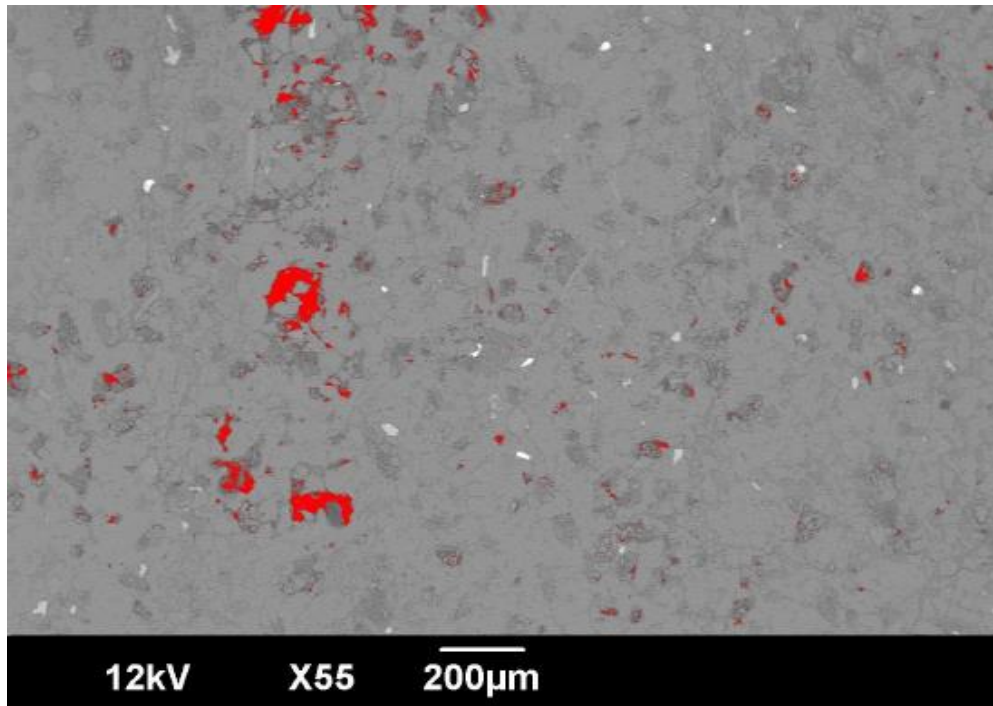


Ilustración 10. Micrografía grano tipo 4. Ejemplo cálculo de área porosa para muestra.

Fuente: los autores

IMAGEN	% POROSIDAD
G 4 1	1,50%
G 4 2	1,15%
G 4 3	2,60%
G 4 4	1,51%
<b>Promedio</b>	<b>1,69%</b>

Tabla 9 % Área porosa Grano Tipo 4.

Fuente: los autores

## 4.4 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

### 4.4.1 Grano Tipo 1.

En este tipo de grano se encontró minerales de cuarzo y óxido de hierro de la muestra de la cantera “El recurso”. La identificación de los minerales se observa en la micrografía de la ilustración (11-13) con sus respectivos análisis de espectros por mineral.

<b>MINERALES DETECTADOS POR SEM Y EDX</b>	<b>Abreviaturas según</b>
Cuarzo	Qtz
Óxido de Hierro	Ox H

Tabla 10. Grano tipo 1: Minerales detectados.

Fuente: los autores

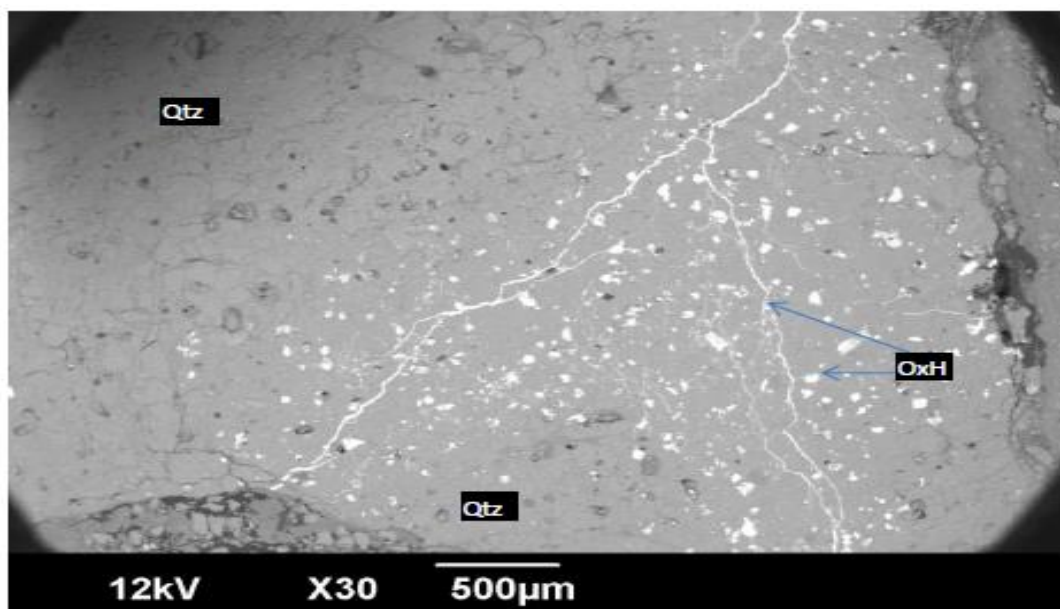


Ilustración 11. Micrografía 5. Imagen generalizada de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados.

Fuente: los autores

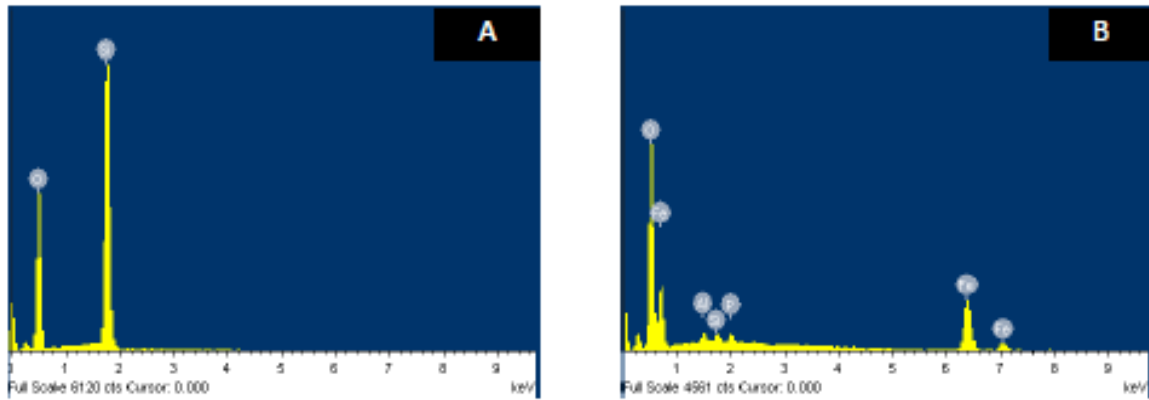


Ilustración 12. Espectro 1. De izquierda a derecha espectros de A) Cuarzo y B) Óxido de hierro.

Fuente: los autores

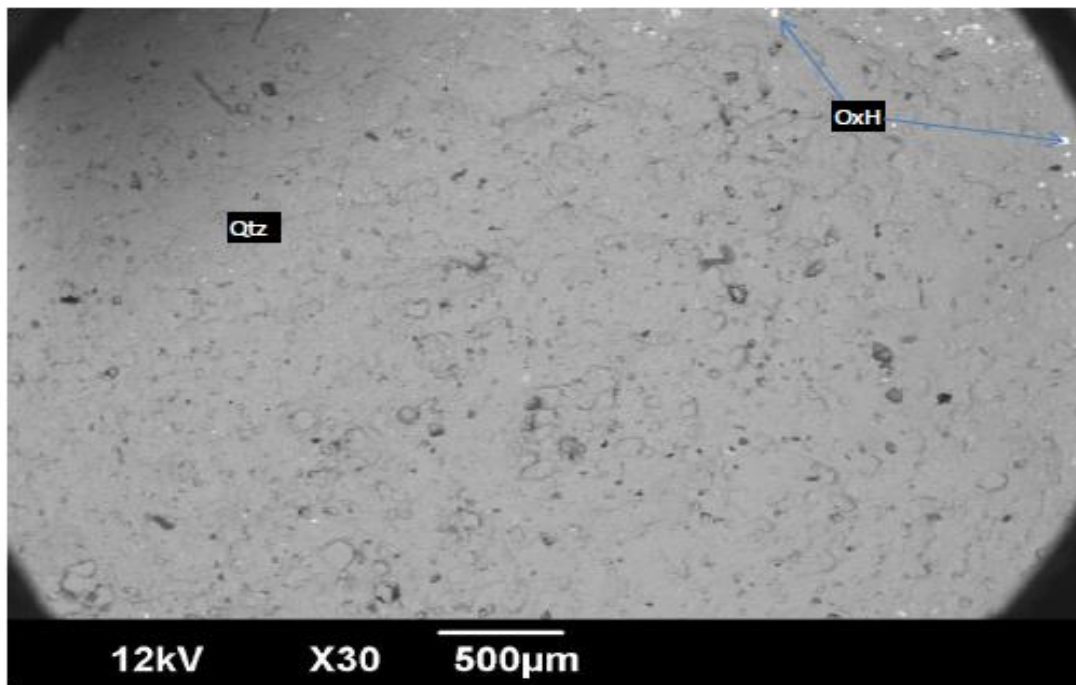


Ilustración 13. Micrografía 6. Imagen generalizada de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados.

Fuente: los autores

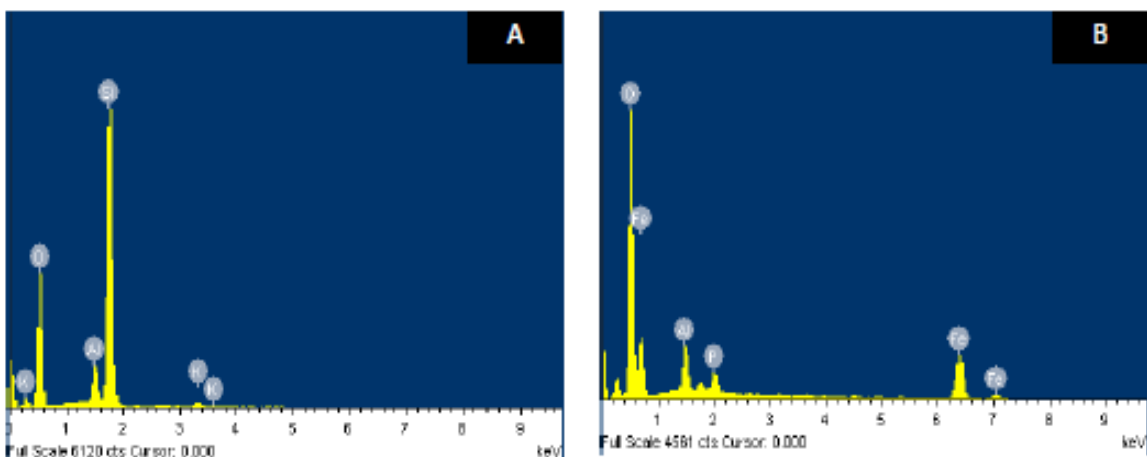


Ilustración 14. Espectro 2. De izquierda a derecha espectros de a) Cuarzo y B) Óxido de hierro.

Fuente: los autores

En algunos sectores de la muestra se detectó la presencia en bajo porcentaje en peso (<5%) de elementos como Aluminio (Al) y Potasio (K) lo que sugiere que en la muestra existen minerales de la arcilla. De acuerdo a los resultados de difracción de rayos X la arcilla presente en la muestra corresponde a Caolinita.

#### 4.4.2 Grano tipo 2.

MINERALES DETECTADOS POR SEM Y EDX	Abreviaturas según
Caolinita	Kln

Tabla 11. Grano tipo 2: Minerales detectados.

Fuente: los autores

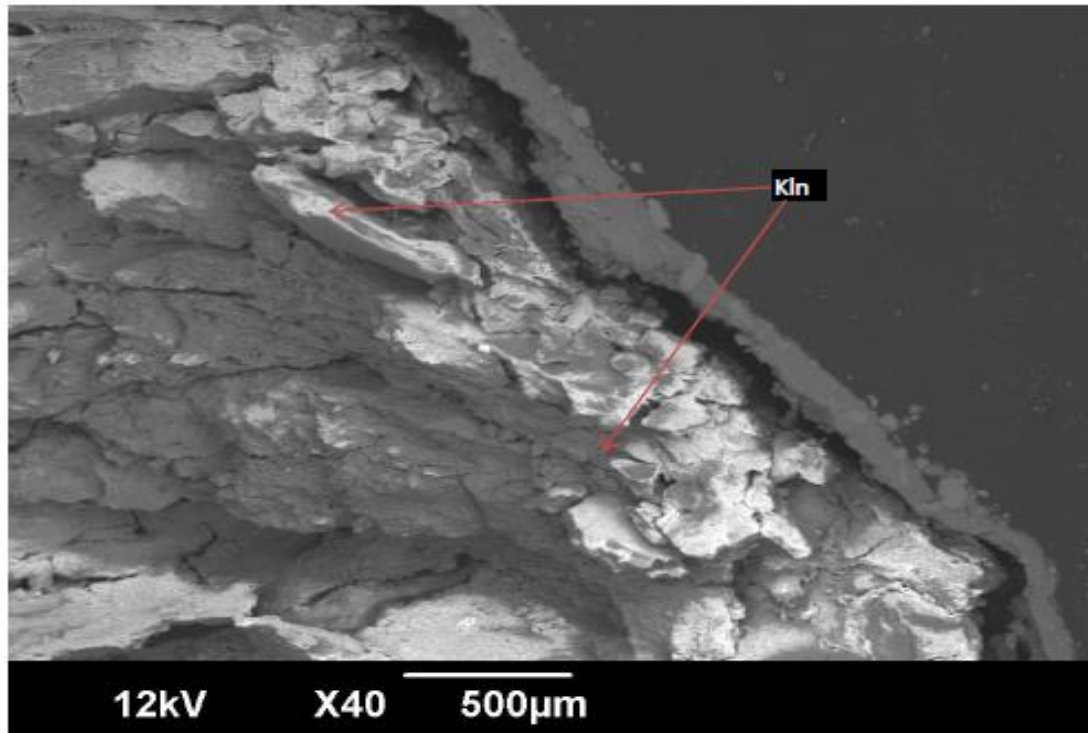


Ilustración 15. Micrografía 7. Imagen generalizada de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados.

Fuente: los autores

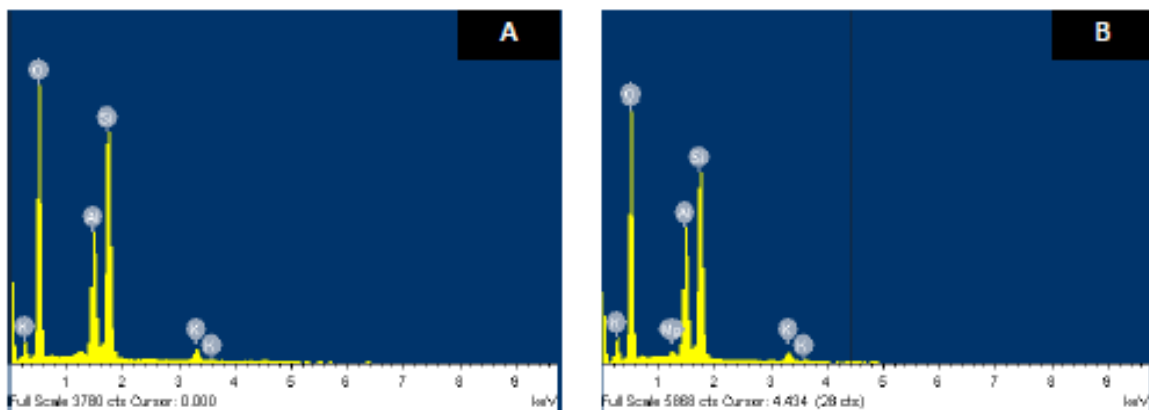


Ilustración 16. Espectros 3. Espectro de A y B) Caolinita.

Fuente: los autores

4.4.3 Grano tipo 3.

MINERALES DETECTADOS POR SEM Y EDX	Abreviaturas según
Caolinita	Kln
Cuarzo	Qtz
Circon	Zr
Rutilo	Rt

Tabla 12. Grano tipo 3: Minerales detectados.

Fuente: los autores

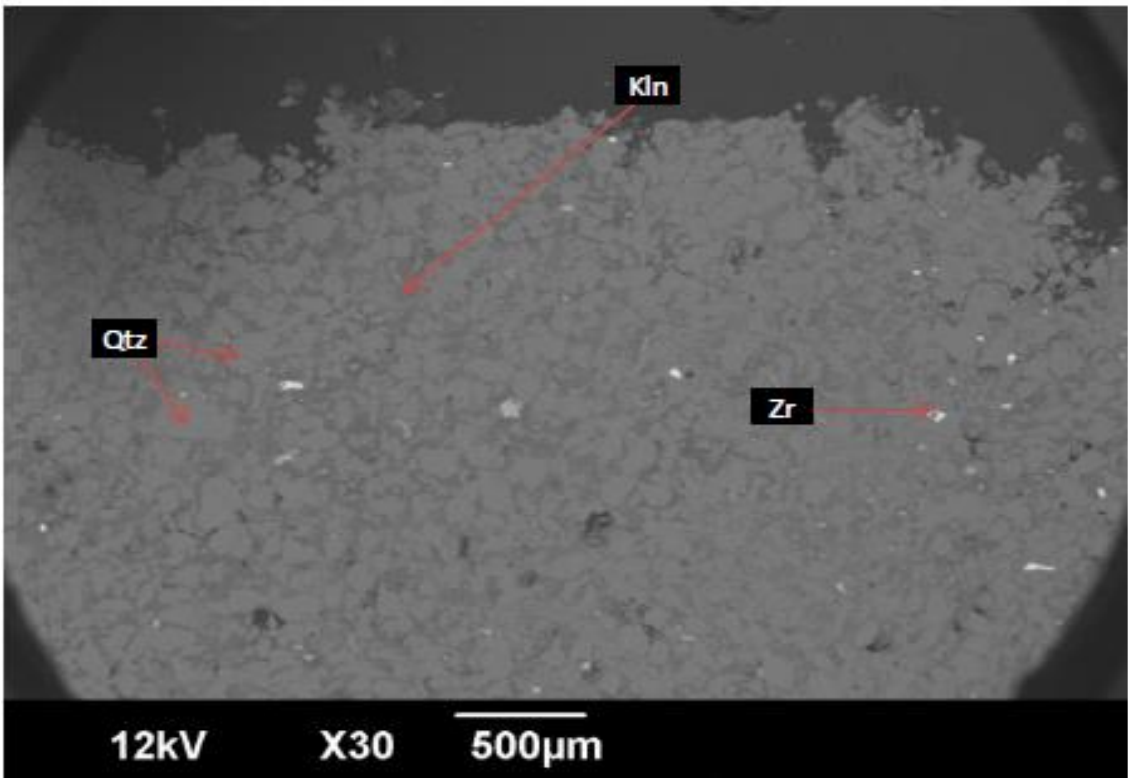


Ilustración 17. Micrografía 9. Imagen general de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados.

Fuente: los autores



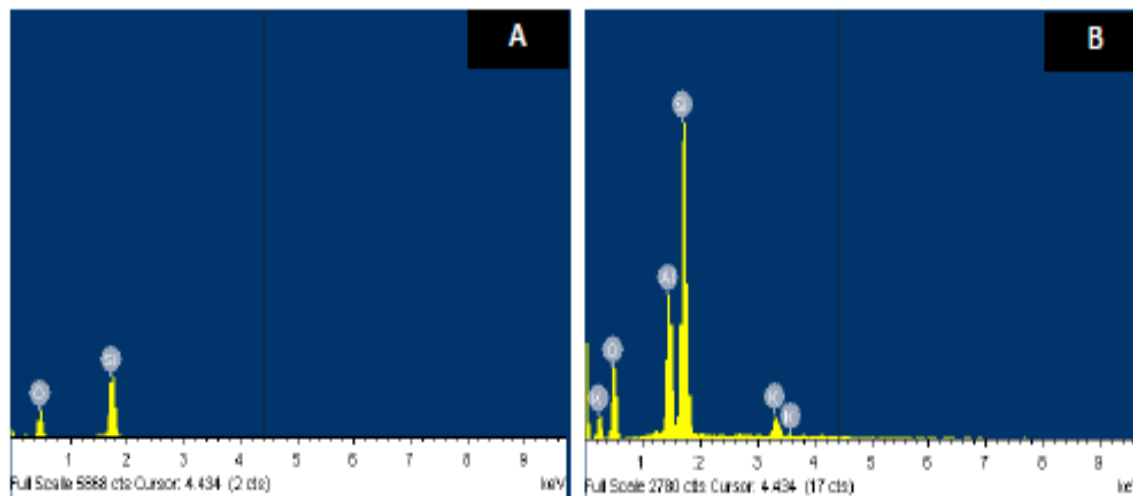


Ilustración 18. Espectros 4. De izquierda a derecha espectros de a) Cuarzo y B) Caolinita.

Fuente: los autores

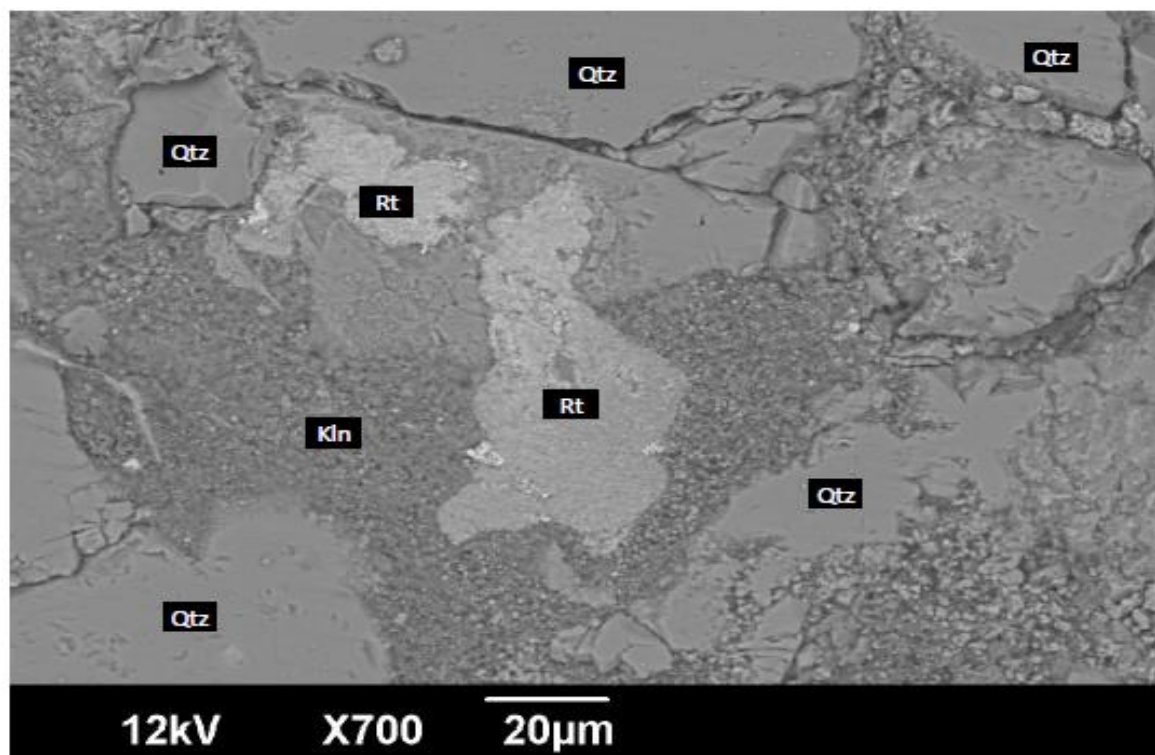


Ilustración 19. Micrografía 10. Imagen detallada de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados.

Fuente: los autores



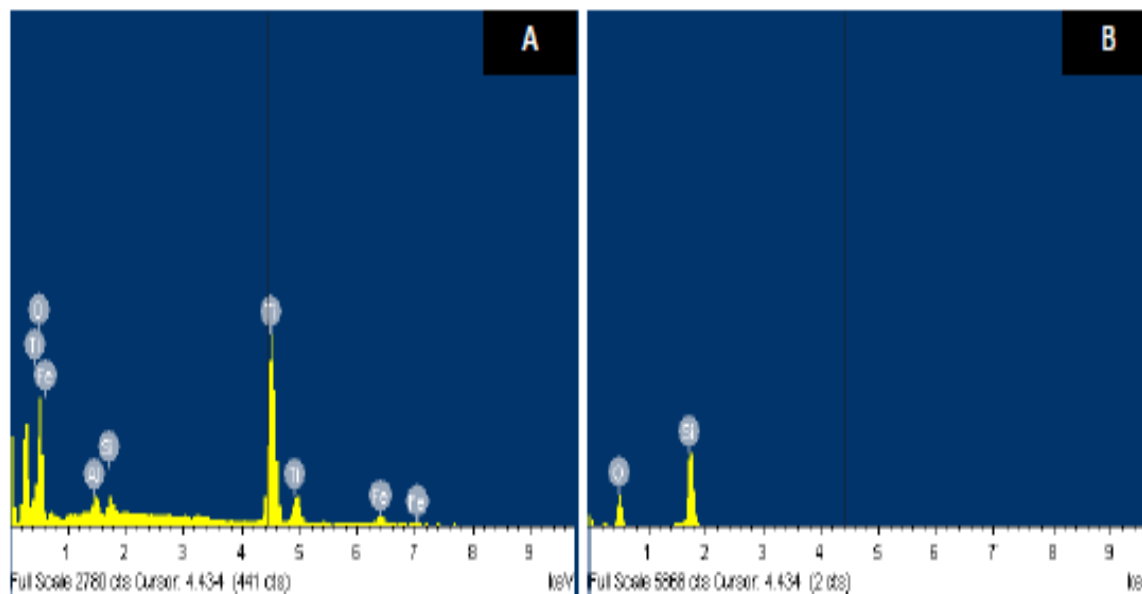


Ilustración 20. Espectros 5. De izquierda a derecha espectros de a) Rutilo y B) Cuarzo.

Fuente: los autores

#### 4.4.4 Grano tipo 4.

MINERALES DETECTADOS POR SEM Y EDX	Abreviaturas según IUGS
Caolinita	Kln
Cuarzo	Qtz
Circón	Zr

Tabla 13. Grano tipo 4: Minerales detectados.

Fuente: los autores

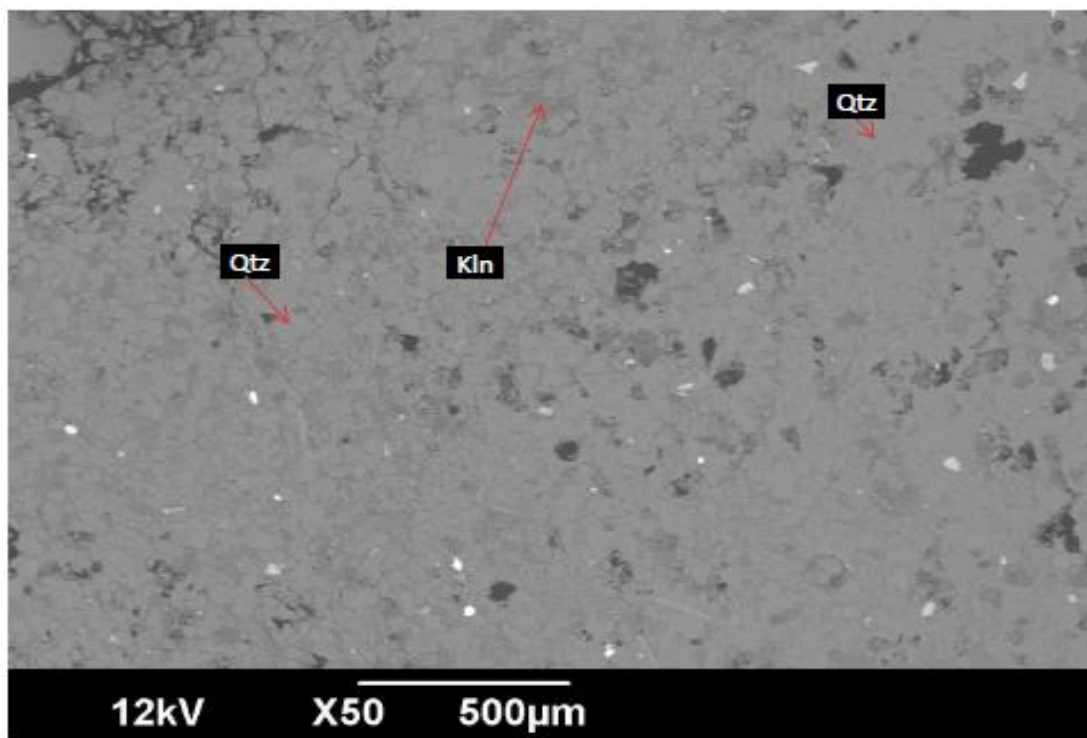


Ilustración 21. Micrografía 11. Imagen general de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados.

Fuente: los autores

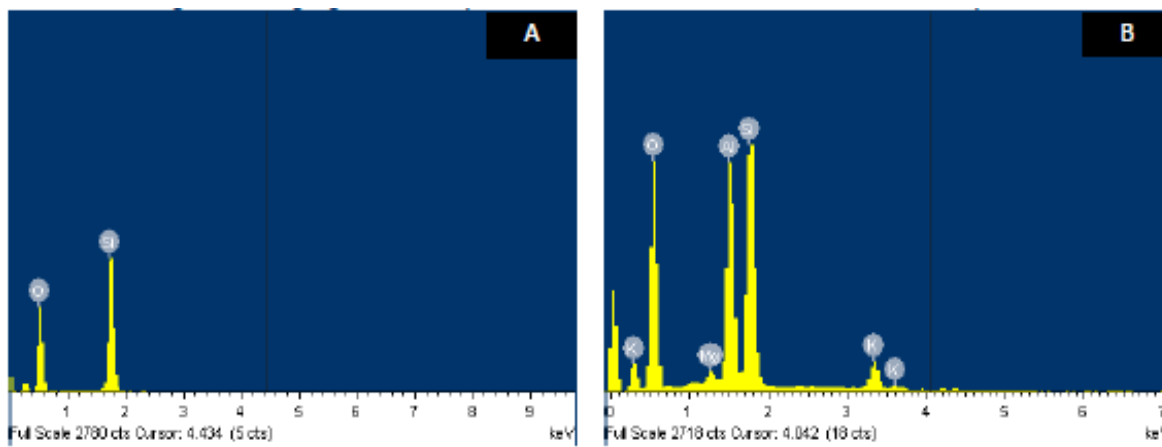


Ilustración 22. Espectros 6. De izquierda a derecha espectros de a) Cuarzo y B) Caolinita.

Fuente: los autores

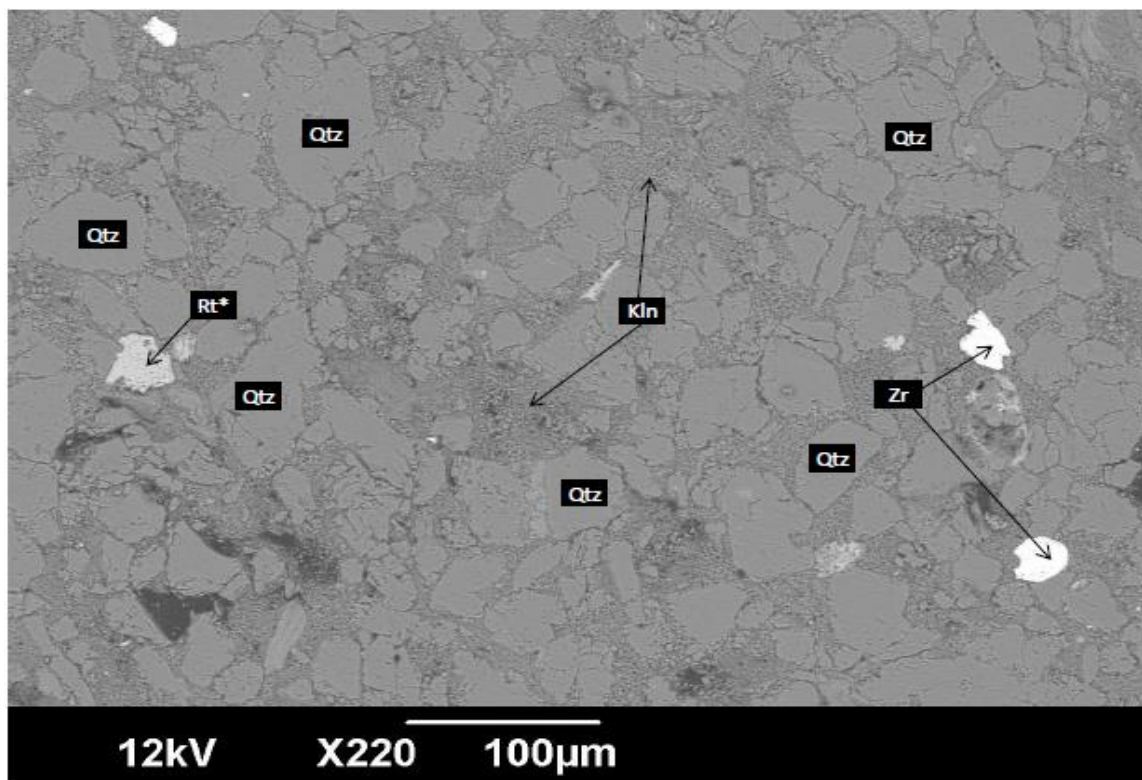


Ilustración 23. Micrografía 11. Imagen detallada de la superficie de la muestra con detección de electrones retrodispersados. Rt\*: El mineral no fue confirmado por EDS pero por las propiedades que presenta es posible que se trate de rutilo.

Fuente: los autores

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Al analizar los componentes mineralógicos, químicos y porosimétrica de la muestra, se pueden vislumbrar las características del material con lo que, podemos inferir el comportamiento de este, en su utilización para la construcción de obras viales.
- Encontrando gran contenido de cuarzo en la composición de la muestra se puede determinar la resistencia mecánica, durabilidad, adherencia, textura superficial con una estabilidad química y una dureza grado 7 según la escala de Mohs, determinando así que es un material idóneo para su uso en bases, sub-bases y mezclas asfálticas debido a sus características.
- La muestra de agregado que se analizó por difracción de rayos X (DRX) arroja como resultado que su composición es del 83% cuarzo y 17% moscovita.
- El agregado estudiado arroja un alto porcentaje de cuarzo; como es de conocimiento dicho componente es el más duro de las rocas de construcción, resaltando su resistencia al corte y al pulimento.
- Los resultados de la muestra nos arroja que se encuentran dos tipos de fragmentos. Los fragmentos principales están compuestos de cuarzo (Granos tipo 1,2 Y 4 descritos en sección SEM) y los fragmentos secundarios compuestos por moscovita (Granos tipo 3 descritos en sección SEM).
- Se considera de gran importancia para la industria de mezclas asfálticas la realización de estos estudios y ensayos, teniendo en cuenta los beneficios obtenidos de los resultados de los análisis realizados a los agregados pétreos, resaltando la tecnología empleada y los parámetros evaluados.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Villavicencio. (2017). información del municipio. Recuperado de <http://www.villavicencio.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- Alruiz, O., Morell, S., Suazo, C., & Naranjo, A. (2009). A novel approach to the geometallurgical modelling of the Collahuasi grinding circuit. *Minerals Engineering*, 22, 1060-1067.
- Benito, E., Paz, A., & Pini, R. (2010). Aplicación de la técnica de porosimetría por intrusión de mercurio en el estudio de la porosidad de un conjunto de suelos del NW de España. Recuperado de <http://www.secs.com.es/data/Revista%20edafo/Suelo/Vol2/n1/documento%202.pdf>
- Congreso de la República de Colombia. (2001). Ley 685, por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. Recuperado de <http://www.bdlaw.com/assets/htmldocuments/Colombia%20-%20Ley%20658%20de%202001%20Mining%20Law.PDF>
- Contreras Torres, L. F. (2015). Caracterización mineralógica del proceso metalúrgico y su impacto en la producción de concentrados de CU y MO en CMDIC. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/132728/Caracterizacion-mineralogica-del-proceso-metalurgico-y-su-impacto-en-la-produccion-de....pdf?sequence=1>
- Ferreira Cuéllar, D. A., & Torres López, K. M. (2014). Caracterización física de agregados pétreos para concretos. Caso: Vista Hermosa (Mosquera) y mina CEMEX (Apulo). Recuperado de <http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1655/1/TRABAJO%20DE%20INVESTIGACION.pdf>
- gmas+Soluciones Geocientíficas. (2016). *gmas* +. Recuperado el 05 de 10 de 2017, de [http://gmaslab.com/drx\\_xrd/](http://gmaslab.com/drx_xrd/)
- Ministerio del Medio Ambiente de la República de Colombia (1998). Guía ambiental para actividades del subsector materiales de construcción – canteras fase de explotación (GMCE). Recuperado de [http://www.academia.edu/24572355/GU%C3%8DA\\_AMBIENTAL\\_PARA\\_ACTIVIDA](http://www.academia.edu/24572355/GU%C3%8DA_AMBIENTAL_PARA_ACTIVIDA)

DES\_DEL\_SUBSECTOR\_MATERIALES\_DE\_CONSTRUCCI%C3%93N\_CANTERA  
S\_FASE\_DE\_EXPLORACI%C3%93N\_GMCE\_BIOTOPO\_Ltda

- Hoal, K., Stammer, J., Appleby, S., Botha, J., Ross, J., & Botha, P. (2009). Research in quantitative mineralogy: Examples from diverse applications. *Minerals Engineering*, 22, 402-408.
- INCAR. (2016). *Intituto Nacional del Carbon*. Recuperado el 12 de 05 de 2017
- Knorr, K. (2011). Advances in quantitative X-Ray mineralogy - Mixed crystals in bauxite. *Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)* (págs. 377 - 382). Trondheim: Springer.
- Lopez Garavito, L. Y., & Sepulveda, D. (Diciembre de 2014). *Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia - RIUCaC*. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de Universidad Catolica de Colombia: <http://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/1801>
- Loubser, M., & Verryin, S. (2008). Combining XRF and XRD analyses and sample preparation to solve mineralogical problems. *South African Journal of Geology*, 111, 229-238.
- Masterman, G. J. (Junio de 2003). Structural and Geochemical Evolution of the Rosario Copper-Molybdenum Porphyry Deposit and Related Copper-Silver Veins, Collahuasi District, Northern Chile. Ph.D, Australia: Universidad de Tasmania
- Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Gali, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *VXII*(1), 1-23. Recuperado <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94315961002>
- Oghazi, P., & Palsson, B. (2011). Comparing the mineralogical characterisation of iron ore by using QEMSCAM and PTA. *Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)* (págs. 479-483). Trondheim: Springer
- Ojeda Escamilla, M. D., Reyes Bahena, J. L., & Aragón Piñas, A. (2010). Metso. Recuperado de [http://www.metso.com/miningandconstruction/mct\\_service.nsf/WebWID/WTB-120105-22576-05F95/\\$File/001.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/mct_service.nsf/WebWID/WTB-120105-22576-05F95/$File/001.pdf)
- Ramírez Rojas, M. I. (2008). Sostenibilidad de la explotación de materiales de construcción en el Valle de Aburrá. Recuperado de [http://www.bdigital.unal.edu.co/950/1/43207166\\_2009.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/950/1/43207166_2009.pdf)

- Ropero Angarita, W. L., & Guzman Sarabia, A. (21 de Noviembre de 2014). *Repositorio Institucional UFPSO*. Recuperado el 7 de Junio de 2017, de <http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/handle/123456789/509>
- Rull Pérez, F. (2010). Nuevas Fronteras en Mineralogía y Geoquímica de Campo. *Macla. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía (13)*. Recuperado de [http://www.ehu.eus/sem/macra\\_pdf/macra13/Macla13\\_189.pdf](http://www.ehu.eus/sem/macra_pdf/macra13/Macla13_189.pdf)
- Segura Pérez, I., & Moragues Terrados, A. (2012). *Archivo Digital UPM*. Recuperado el 12 de 05 de 2017
- Smith, A., Viljoen, K., Schouwstra, R., Roberts, J., Scharlwyk, C., & Gutzmer, J. (2013). Geological variations in the Merensky Reef at Bafokeng Rasimone Platinum Mine and its influence on flotation performance. *Minerals Engineering*, 52, 155-168.
- Tamayo y Tamayo, M. (2003). *El Proceso de la Investigación Científica*. Mexico D.F.: Limusa S.A.
- Torrence, M., Germaine, J., Zhang, G. & Whittle, A. (2003). A simple sample-mounting method for random powder X-RAY diffraction. *Clays and Clay Mineral*, 51(2), 218-255.
- Urqueta, E., Kyser, T., Clark, A., Stanley, C., & Oates, C. (2009). Lithogeochemistry of the Collahuasi porphyry Cu-Mo and epithermal Cu-Ag (-Au) cluster, northern Chile: Pearce element ratio vectors to or. *Geochemistry: Exploration, Environment Analysis*, 9, 9-17.
- Villavicencio.wikispaces.com. (2018). Sistema de soporte ambiental del municipio. Recuperado de <https://villavicencio.wikispaces.com/10+Mapas>
- Wikipedia. (2018). Meta (Colombia). Recuperado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Meta\\_\(Colombia\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Meta_(Colombia))